

## 炭素鋼の衝撃引張に関する実験(第2報)：円周切欠きをもつ鋼材について

その他（別言語等） のタイトル	Experiments on High Speed Impact Tensile Tests of the Steel (Report 2) : On the steel bar with round notch
著者	内藤 正鄰, 浜田 恒平, 相沢 久司
雑誌名	室蘭工業大学研究報告. 理工編
巻	7
号	2
ページ	553-562
発行年	1971-09-15
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/3532">http://hdl.handle.net/10258/3532</a>

# 炭素鋼の衝撃引張に関する実験 (第2報)

—— 円周切欠きをもつ鋼材について ——

内 藤 正 隣 ・ 浜 田 恒 平 ・ 相 沢 久 司

## Experiments on High Speed Impact Tensile Tests of the Steel (Report 2)

— On the steel bar with round notch —

Masachika Naito, Kouhei Hamada  
and Hisashi Aizawa

### Abstract

This paper describes the strength and the behaviour of the notched steel bar under impulsive load. Carbon steel (S15C, S25C and S50C) with various circumferential notches are used and tests are carried out from static region to 20 m/s. The load is measured by strain-gauges attached on the load cell, and for measuring displacements capacitance gauges (cylindrical shell plates) are used. The results obtained are summarized as follows:

- (1) The tensile strength of the notched bar increases when the notch becomes sharper, and approaches to certain maximum value.
- (2) The tensile strength of the notched bar increases with increase of impact speed.
- (3) A characteristic elongation-time relation is recorded.
- (4) The constraint of plastic deformation at the root of notch is one of the important factors for the increase of strength.

### I. 緒 言

構造物や機械の構成部材には、円孔、ノッチ、フィレット等といった応力集中の要因となるような形状がいたるところに存在し、切欠き効果を生じさせている。このような切欠き形状の部材は、疲労試験において平滑材よりも低い荷重で破壊することから、切欠きの研究は主として疲労試験に関して取り上げられて来た。一般的に、切欠きは強度を低下させるといわれているが、円周切欠きを持つ丸棒の静荷重による引張試験の場合は、逆に降伏点、引張強さの増加の現象がみられ、ある鋭さの切欠き形状においては脆性破壊をおこすことが知られている<sup>1)</sup>。このように切欠きについての研究は、疲労および静荷重下における研究がほとんどで、衝撃荷重下における研究は、作井らによる切欠き材の引張特性の研究<sup>2),3)</sup> 以外あまり行なわれておらず、より広範囲の速度、材料、切欠き形状についての研究が必要であろう。そこで、U型の円周切欠きを持った3種類の炭素鋼 (S15C, S25C, S50C) について、衝撃荷重下での切欠き効果を材料の強度および変形能からとらえてみた。

## II. 実験装置および方法

実験装置は第1報<sup>4)</sup>の回転円板式高速衝撃引張試験機を用いた。切欠き材の衝撃引張試験では、荷重を加えてから破断にいたるまでの時間が短いため、衝撃荷重の測定は非常に困難である。これらの点を考慮して図-1および図-2に示す2組のロードセル(材質S45C)を用いて実験を行なった。ロードセルAは主として切欠き材の試験に、ロードセルBは主として平滑材の試験に用いた。実験に用いた切欠き試験片の外形を図-3、平滑試験片を図-4に示す。切欠き試験片の伸びの測定は切欠き部の平均伸びとして図-4に示す円筒形の極板を用いて容量型微小変位計(岩通製DM-12)によって、試験片前後の衝撃荷重と同時に測定記録した。

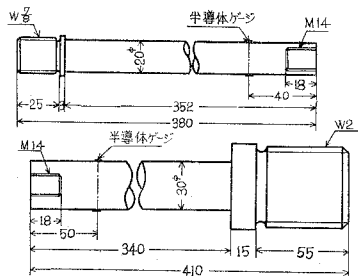


図-1 ロードセル A

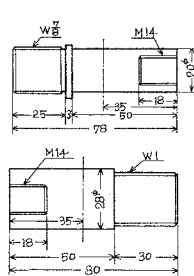


図-2 ロードセル B

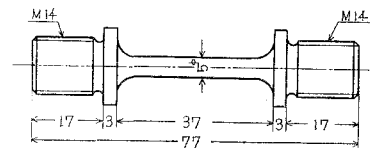


図-3 平滑試験片

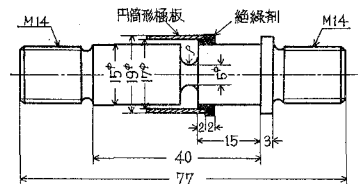


図-4 切欠き試験片

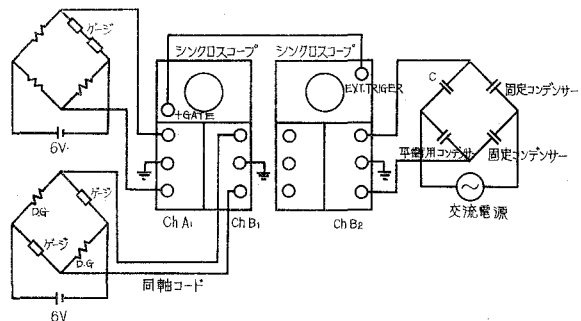


図-5 測定系ブロックダイアグラム

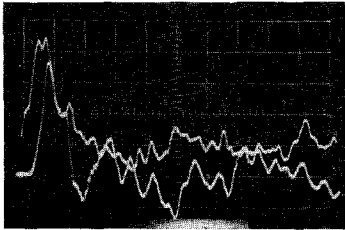
これらの測定系ブロックダイアグラムを図-5に示す。実験に用いた試料は第1報の熱処理を行なってないS15C, S25C, S50Cの3種類の炭素鋼である。試験片は、平滑材と切欠き半径 $\rho$ が0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm, 4.0 mmの5種類で、これらについて静荷重および衝撃速度 $V$ を5 m/s, 10 m/s, 20 m/sに変化させて行なった。

## III. 実験結果および考察

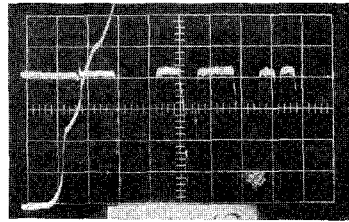
### 1. 測定結果

記録した衝撃荷重の波形を図-6.1, 伸びの波形を図-6.2に示す。ここで円板の爪, ロー

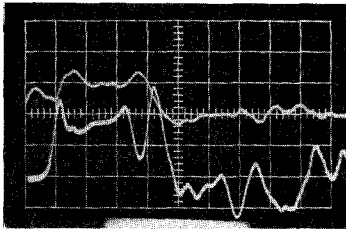
ドセル等は十分に強さに設計してあるので、一応変形も少なく剛体に近いと仮定すれば、切欠き部の変形は円板の爪に拘束され一定速度で伸びる。すなわち、伸びの波形は伸び始めより破断後においても衝撃速度に比例した一定傾斜で進むはずである。しかし、実際には爪の取付部の磨耗、試験片取付の不完全などから伸びの波形にいくつかの変極点が見られるため、伸びの



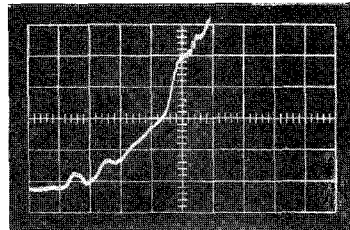
図—6.1.1 S15C,  $\rho = 0.5 \text{ mm}$   
 $V = 10 \text{ m/s}$ ,  $t = 50 \mu \text{ s/cm}$



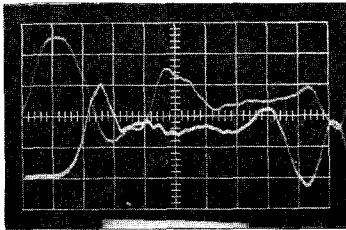
図—6.2.1 S15C,  $\rho = 0.5 \text{ mm}$   
 $V = 10 \text{ m/s}$ ,  $t = 50 \mu \text{ s/cm}$



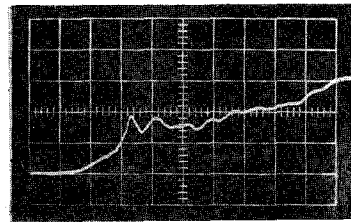
図—6.1.2 S15C,  $\rho = 1.0 \text{ mm}$   
 $V = 5 \text{ m/s}$ ,  $t = 50 \mu \text{ s/cm}$



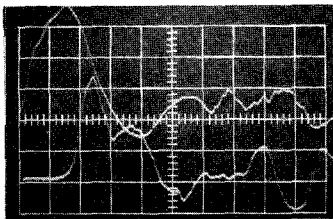
図—6.2.2 S15C,  $\rho = 1.0 \text{ mm}$   
 $V = 5 \text{ m/s}$ ,  $t = 50 \mu \text{ s/cm}$



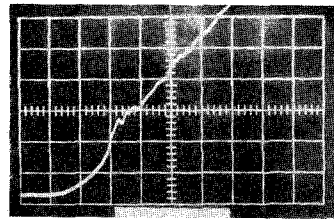
図—6.1.3 S15C,  $\rho = 1.0 \text{ mm}$   
 $V = 10 \text{ m/s}$ ,  $t = 20 \mu \text{ s/cm}$



図—6.2.3 S15C,  $\rho = 1.0 \text{ mm}$   
 $V = 10 \text{ m/s}$ ,  $t = 20 \mu \text{ s/cm}$



図—6.1.4 S15C,  $\rho = 1.0 \text{ mm}$   
 $V = 20 \text{ m/s}$ ,  $t = 20 \mu \text{ s/cm}$



図—6.2.4 S15C,  $\rho = 1.0 \text{ mm}$   
 $V = 20 \text{ m/s}$ ,  $t = 20 \mu \text{ s/cm}$

波形より明確な破断時間を求めることは困難である。そこで①試験後の試験片の伸びと②固定側ロードセルの出力波形の立上りから破断に至るまでの時間を求めこれに基づいて伸び波形より伸びを求めた。これら①と②の関係を図-7に示す。ここで②にくらべて①の伸びがやや大きいのは、破断した試験片の破断面が計測の時完全に一致しないためと考えられる。又

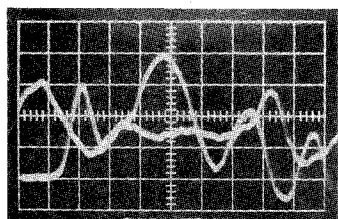


図-6.1.5 S15C,  $\rho=2.0$  mm  
 $V=10$  m/s,  $t=20 \mu$  s/cm

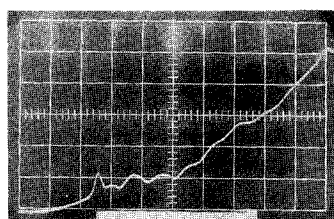


図-6.2.5 S15C,  $\rho=2.0$  mm  
 $V=10$  m/s,  $t=20 \mu$  s/cm

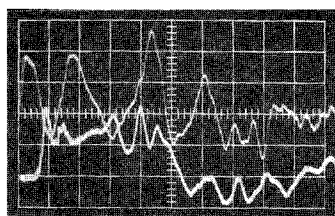


図-6.1.6 S15C  $\rho=4.0$  mm  
 $V=10$  m/s,  $t=50 \mu$  s/cm

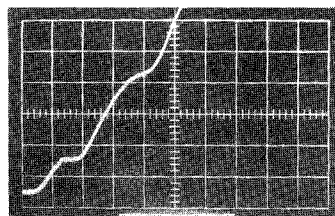


図-6.2.6 S15C  $\rho=4.0$  mm  
 $V=10$  m/s,  $t=50 \mu$  s/cm

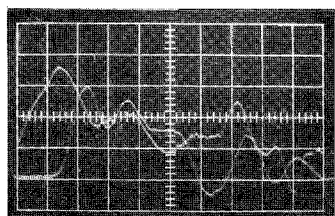


図-6.1.7 S25C,  $\rho=4.0$  mm  
 $V=20$  m/s,  $t=20 \mu$  s/cm

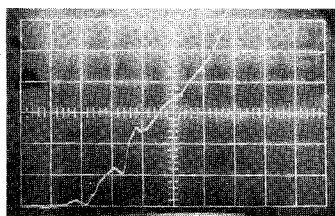


図-6.2.7 S25C  $\rho=4.0$  mm  
 $V=20$  m/s,  $t=20 \mu$  s/cm

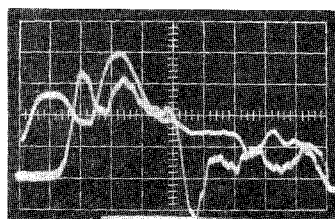


図-6.1.8 S50C,  $\rho=4.0$  mm  
 $V=20$  m/s,  $t=20 \mu$  s/cm

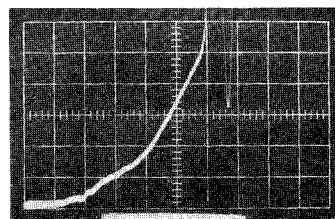


図-6.2.8 S50C  $\rho=4.0$  mm  
 $V=20$  m/s,  $t=20 \mu$  s/cm

②の伸びは除荷波が試験片の完全な分離以前より生じているため少し小さめに記録されるのではないか。又伸びの時間的变化は、ほぼ衝撃速度に一致した傾斜を示している。これらのことから、本実験に用いた容量変化による伸びの測定は有効な方法であろう。

次に S15C の衝撃荷重の波形のうち、切欠き半径  $\rho=1.0\text{ mm}$  以上、衝撃速度  $V=10\text{ m/s}$  以下の条件、すなわち、この場合よりも破断にいたるまでの時間が長い試験では、アンビルからの反射波が固定側

ロードセルのゲージ位置に到達した後、破断が生じると考えられ、弾性波の速度  $C=5,130\text{ m/s}$  とすれば、固定側ロードセルは応力の立上りから約  $110\sim 120\text{ }\mu\text{s}$  後に反射波の影響を受けることになり実験結果と大体一致する。

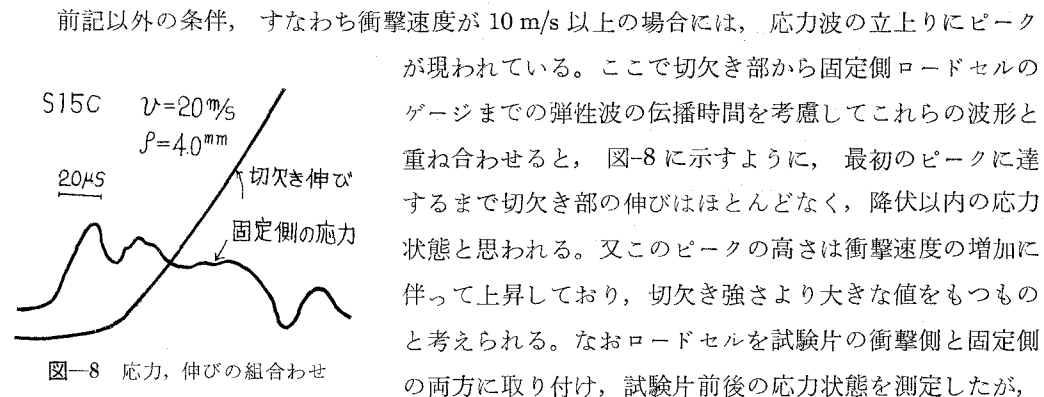


図-7 実測伸び一波形伸び関係

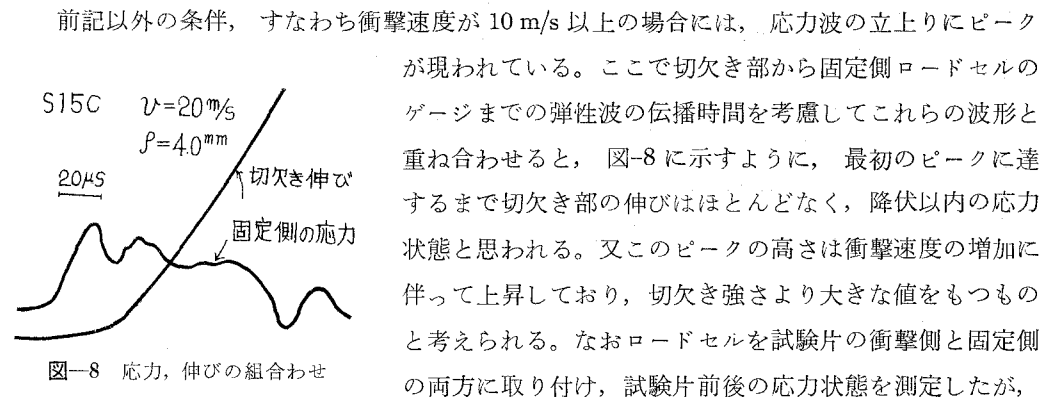


図-8 応力、伸びの組合わせ

前記以外の条件、すなわち衝撃速度が  $10\text{ m/s}$  以上の場合には、応力波の立上りにピークが現われている。ここで切欠き部から固定側ロードセルのゲージまでの弾性波の伝播時間を考慮してこれらの波形と重ね合わせると、図-8に示すように、最初のピークに達するまで切欠き部の伸びはほとんどなく、降伏以内の応力状態と思われる。又このピークの高さは衝撃速度の増加に伴って上昇しており、切欠き強さより大きな値をもつものと考えられる。なおロードセルを試験片の衝撃側と固定側の両方に取り付け、試験片前後の応力状態を測定したが、

その差は少なく、エネルギーの吸収については定性的には分かるが、測定の困難性から定量的に求めるまでに至ってない。そこで強さとして、試験片通過後の固定側ロードセルの応力を用いた。

## 2. 切欠き強さ

切欠き強さと衝撃速度の関係を図-9に、切欠き強さと切欠き半径の関係を図-10に示す。各材料とも切欠き強さは衝撃速度の増大、および切欠き半径の減少に伴って上昇している。しかし、衝撃荷重下において、衝撃速度の増加に伴う切欠き強さの増大はそれほど顕著でない。S45C材においては、切欠き半径の小さい領域、衝撃速度の速い領域で脆性破壊の占める割合が大きくなるが、切欠き強さの衝撃速度依存性はほとんどみられなかった。

## 3. 変形能について

変形能としては切欠き部の伸び、絞りなどが考えられるが、伸びとしてU溝幅の平均伸

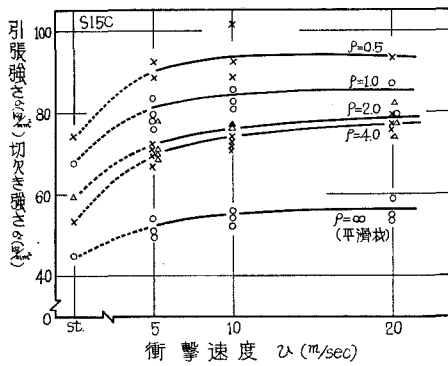


図-9-1 S15C の衝撃速度，  
切欠き強さ関係

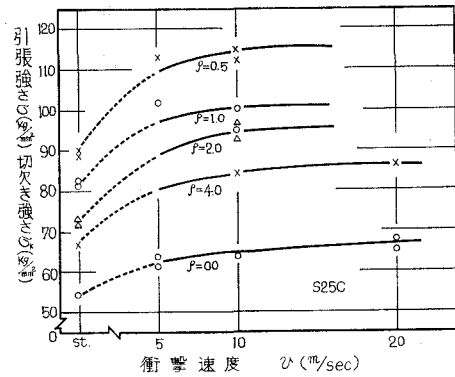


図-9-2 S25C の衝撃速度，  
切欠き強さ関係

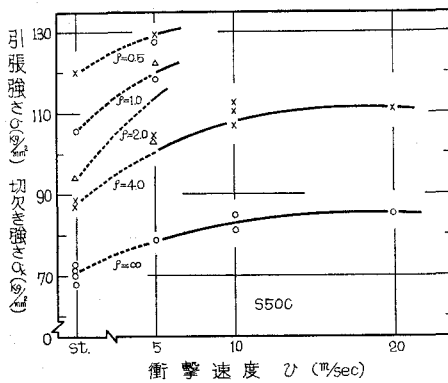


図-9-3 S50C の衝撃速度，  
切欠き強さ関係

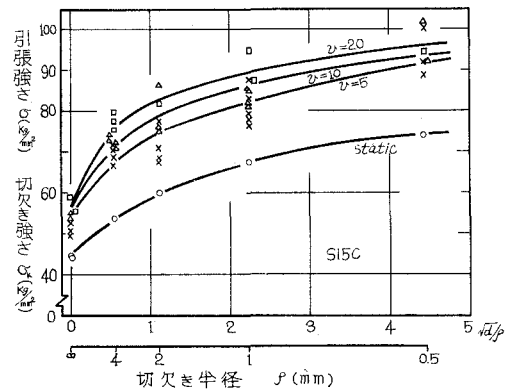


図-10-1 S15C の切欠き半径，  
切欠き強さ関係

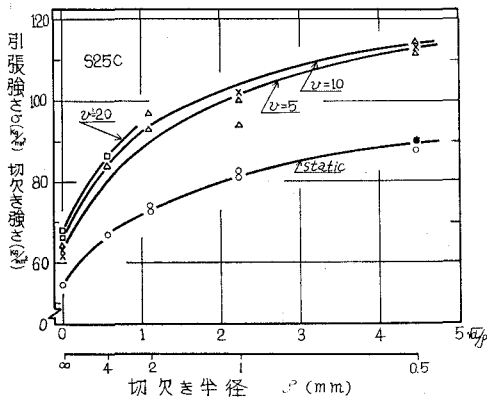


図-10-2 S25C の切欠き半径，  
切欠き強さ関係

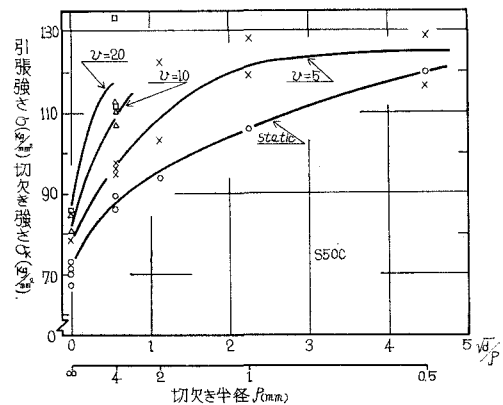
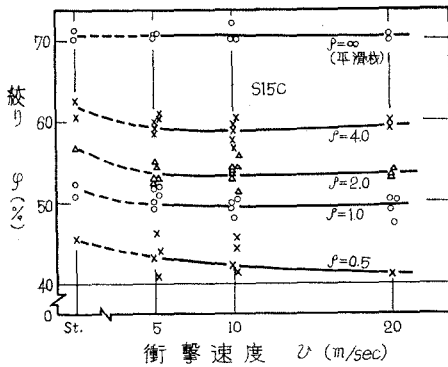
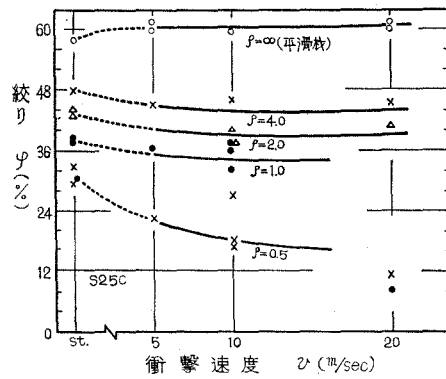


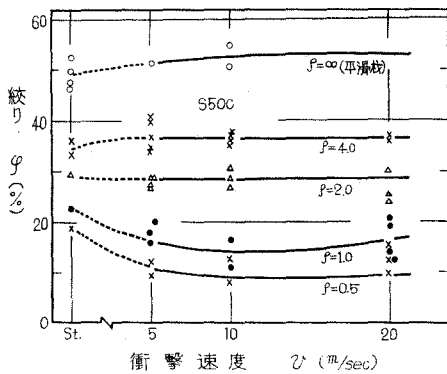
図-10-3 S50C の切欠き半径，  
切欠き強さ関係



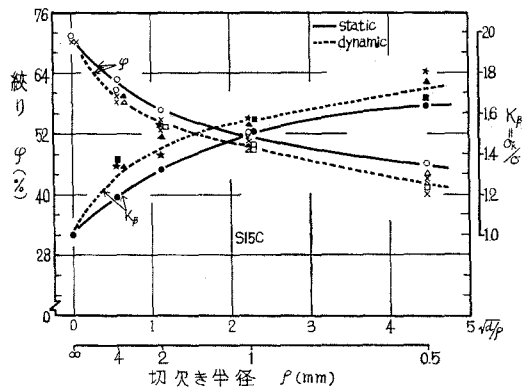
図—11.1 S15C の衝撃速度，  
絞り関係



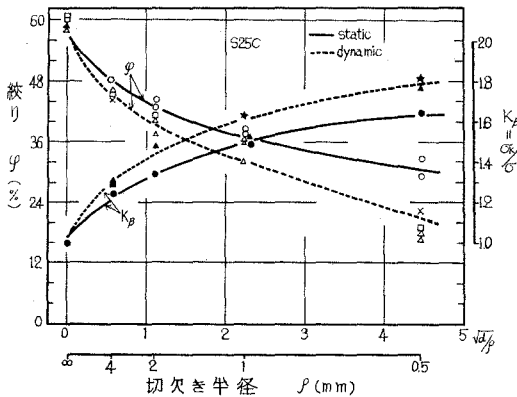
図—11.2 S25C の衝撃速度，  
絞り関係



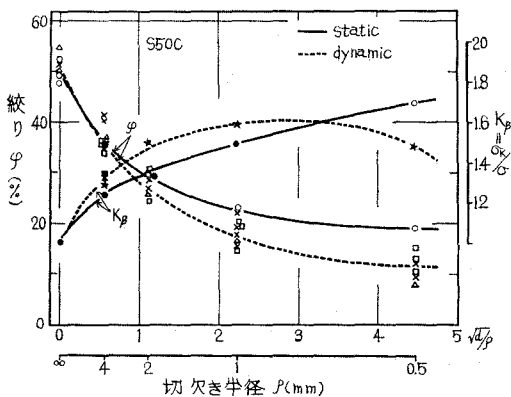
図—11.3 S50C の衝撃速度，  
絞り関係



図—12.1 S15C の切欠き効果，  
切欠き半径，絞り関係



図—12.2 S25C の切欠き効果，  
切欠き半径，絞り関係



図—12.3 S50C の切欠き効果，  
切欠き半径，絞り関係



びを測定したが、それぞれの切欠き半径  $\rho$  によって U 溝幅が異なるため直接的比較は困難である。そこで絞りについてのみ検討した。図-11 に衝撃速度  $V$  と絞り  $\varphi$  の関係を、切欠き半径  $\rho$  をパラメータとして示す。実験の範囲において絞りはほとんど変化せずほぼ一定値を保っている。特に平滑材については、静荷重から衝撃荷重への移行においても絞りの差がほとんどみられない。一方切欠き材も、衝撃速度によって絞りにあまり差がみられないが、静荷重から衝撃荷重への移行において、やや減少している傾向がみられる。特に切欠き半径の小さい形状ほどその傾向が強い。そこで切欠き効果を表わすのに切欠き材の切欠き強さ  $\sigma_k$  と平滑材の引張強さ  $\sigma$  との比  $k_\rho$ 、切欠き半径  $\rho$ 、および絞り  $\varphi$  との関係を図-12 に示す。図から解かるように、 $k_\rho$  と  $\varphi$  は非常に対称的な傾向を示しており、切欠き底部の変形拘束が切欠き強さの上昇にかなりの影響をおよぼしていることが認められる。また、衝撃速度による切欠き効果の差はあまり顕著には見出せないが、静荷重のそれよりも幾分高められている。

#### 4. 炭 素 量

3 種類の試料の炭素量について絞り  $\varphi$  と切欠き半径  $\rho$  との関係を図-13、切欠き係数  $k_\rho$  と切欠き半径  $\rho$  の関係を図-14 に示す。これらの関係より炭素量によって切欠き効果にほとんど差はなく、特に静荷重においては、3 種類の試料ともほぼ同じ傾向を示している。衝撃荷重についてもほぼ同様であるので  $V=5 \text{ m/s}$  における値を示した。S50C では、切欠き半径  $\rho=0.5 \text{ mm}$  において切欠き係数  $k_\rho$  の低下を示しているが、これは破断の形態が他と異なり脆性破壊の占める割合が多いためでないかと思われる。

#### 5. 硬度測定結果について

切欠き半径  $\rho=0.5 \text{ mm}$ 、 $\rho=4.0 \text{ mm}$  の試験片について、静荷重および衝撃速度  $V=20 \text{ m/s}$  の場合の試験片を軸に平行に切断し図-15 に示す A, B, C の 3 カ所の硬度を微小砂度計（ビッカース、荷重 500 g）を用いて測定した。結果を表-1 に示す。この表より、A 点および B

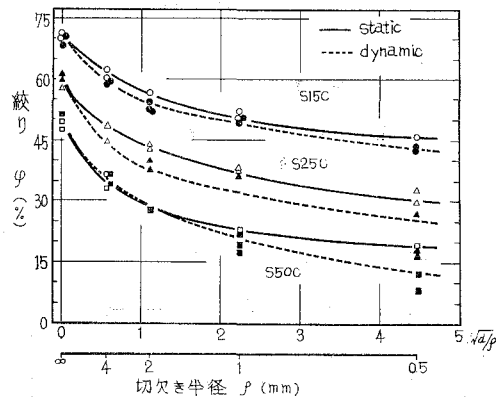


図-13 各試料の切欠き半径、絞り関係

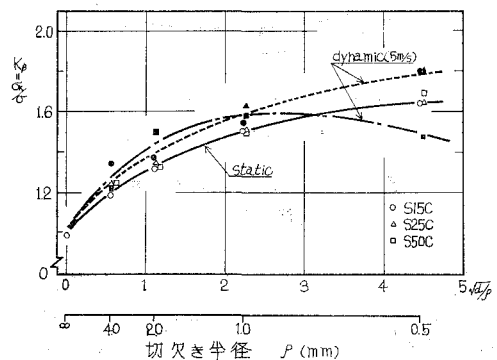


図-14 各試料の切欠き係数、切欠き半径関係

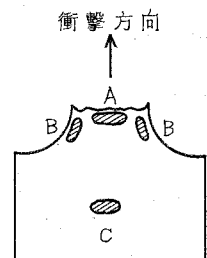


図-15 硬度の測定位置

表—1 硬度測定結果 (マイクロビッカース硬度荷重 500 g)

$\rho$	V	位 置	S15C	S25C	S50C
0.5	static	A	198	214	244
		B	214	234	279
		C	132	162	223
	20 m/s	A	193	194	226
		B	211	215	258
		C	130	154	214
4.0	static	A	218	238	291
		B	211	219	267
		C	127	153	214
	20 m/s	A	222	244	289
		B	217	227	266
		C	129	166	222

点において著しい硬度の上昇が認められ、組織の肉眼観察とよく対比出来る。これらより、 $\rho=0.5\text{ mm}$  と  $\rho=4.0\text{ mm}$  の試験片で硬度の最大を示す位置が異なる。すなわち、 $\rho=0.5\text{ mm}$  では B 点付近が最大で、 $\rho=4.0\text{ mm}$  では A 点付近が最も高い硬度を示す。この傾向は静荷重よりも動荷重の方が、また材質的には炭素量の多い方が著しい。これらより  $\rho=0.5\text{ mm}$  では切欠き底部中心の変形が表面近くの変形より少なく、 $\rho=4.0\text{ mm}$  の試験片とは破断の仕方が異なっていると思われる。

## VI. 結 言

U 型円周切欠きをもつ 3 種類の炭素鋼の衝撃引張試験の結果、次のような結論が得られた。

- (1) 本実験で用いた容量変化による伸びの測定法で切欠き部の伸び—時間曲線をとらえることが可能である。
- (2) 衝撃荷重下の切欠き材の上降伏点は非常に増大し、その大きさは切欠き強さよりも大きくなっていることが推測される。
- (3) 供試材料の材質にかかわらず、切欠き半径の減少、衝撃速度の増大に伴って切欠き強さが増大する。
- (4) 切欠き強さと引張強さの比  $k_p$  で表わした切欠き効果は、静荷重に比べて衝撃荷重の方がやや増加する。
- (5) 絞りと  $k_p$  の関係は非常に対称的であり、切欠き底部の変形拘束が切欠き強さの上昇の大きな要因になっている。

(6) 破断面の硬度の測定から、切欠き半径の小さいものでは破断面の様相が異なっていて S50C では脆性破壊の占める割合が多くなっている。

(昭和 46. 5. 20 受理)

#### 文 献

- 1) Orowan: Reports on Progress in Physics, **12**, 185 (1949).
- 2) 作井誠太・中村正久・布村成具: 鉄と鋼, **46** (10), 1319 (1960).
- 3) 作井誠太・中村正久・大森正信・布村成具: 鉄と鋼, **49** (1), 55 (1963).
- 4) 内藤正鄰・浜田恒平・辺見宣弘: 室工大研究報告, **7** (1), 265 (1970).